



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq
2023/2024)**

**Título do Projeto: TÉCNICA SWITCH BACK NO PROCESSO
SAW: INVESTIGAÇÃO QUANTO AOS ASPECTOS
OPERACIONAIS DE PROCESSO E FORMAÇÃO DO
CORDÃO DE SOLDA**

GUILHERME ZORTÉA

Joinville, 23 de agosto de 2024

RESUMO

O processo de soldagem por arco submerso (SAW) é amplamente empregado nas indústrias de construção pesada e naval devido à sua alta taxa de deposição e produtividade. Contudo, para atingir esses elevados índices de deposição, o método exige uma estrutura robusta, que utiliza fluxo como meio de proteção do cordão de solda, o que pode restringir a mobilidade em determinadas aplicações. Diante disso, não se encontram, tanto nas aplicações industriais quanto na literatura especializada, referências ao uso do movimento de oscilação longitudinal do eletrodo na soldagem por arco submerso, sendo que a aplicação dessa técnica conhecida como Switch Back já é amplamente estudada e validada no processo de soldagem MIG/MAG. Partindo desse princípio, este trabalho realizou uma investigação acerca da viabilidade de aplicação da técnica de Switch Back no processo de soldagem por arco submerso (SAW). Para isso, foi realizada a parametrização da trajetória de soldagem para diferentes padrões de Switch Back e a partir dessa análise de movimento foram realizados ensaios lineares e com a aplicação da técnica para três diferentes níveis de energia de soldagem. A partir da análise dos cordões de solda e estabilidade do processo, foram avaliadas a penetração, largura, reforço, área do reforço e área fundida, além da variação desses parâmetros ao longo do eixo longitudinal dos cordões de solda obtidos. Como resultado, verificou-se a viabilidade de aplicação da técnica Switch Back no processo SAW, a qual resultou em uma considerável variação na penetração ao longo do cordão de solda, sem, entretanto, acarretar instabilidades no processo ou problemas relacionados à inclusão de escória.

Palavras-Chave: Técnica Switch Back; SAW; Morfologia dos cordões de solda; Estabilidade.

ABSTRACT

The submerged arc welding (SAW) process is widely used in heavy construction and shipbuilding industries due to its high deposition rate and productivity. However, to achieve these high deposition rates, the method requires a robust structure that uses flux as a means of protecting the weld bead, which can limit mobility in certain applications. Consequently, there are no references, either in industrial applications or in specialized literature, to the use of longitudinal oscillation of the electrode in submerged arc welding. The application of this technique, known as Switch Back, has already been extensively studied and validated in the MIG/MAG welding process. Based on this principle, this study investigated the feasibility of applying the Switch Back technique in the submerged arc welding (SAW) process. For this purpose, welding path parameters were set for different Switch Back patterns, and linear tests were performed along with the application of the technique at three different welding energy levels. Through the analysis of weld beads and process stability, the penetration, width, reinforcement, reinforcement area, and fusion area were evaluated, as well as the variation of these parameters along the longitudinal axis of the obtained weld beads. As a result, the feasibility of applying the Switch Back technique in the SAW process was confirmed, which led to a considerable variation in penetration along the weld bead without causing process instabilities or issues related to slag inclusion.

Keywords: Switch Back Technique; SAW; Morphology of weld beads; Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquemático do processo de soldagem a arco submerso.....	10
Figura 2 – Exemplos de padrões de tecimento	11
Figura 3 - Superfície e secção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 25 kJ/cm e amplitude de tecimento de (a) 0 mm – Linear; (b) 10 mm; (c) 15 mm; (d) 20 mm; e (e) 30 mm.....	12
Figura 4 - Esquemático da movimentação da tocha na técnica switch back.....	13
Figura 5 - Método Switch Back Utilizado	14
Figura 6 - Resultado experimental aplicando a técnica Switch Back	15
Figura 7 - Movimentação da tocha	15
Figura 8 - Aparência da face traseira dos cordões com fresta de 2 e 4 mm.	16
Figura 9 – Cordões com frestas e desalinhamento	17
Figura 10 - Máxima velocidade de soldagem na obtenção de soldas com boa aparência.....	19
Figura 11 - Condições operacionais da técnica Switch-back	19
Figura 12 – Comparação da macroestrutura longitudinal com ênfase nos padrões colunares dos grãos. a) Unidirecional. b) Bidirecional. c) Switchback.	21
Figura 13 - Imagem de microscopia óptica de (a) Deposição bidirecional (b) Bidirecional ampliada (c) Deposição com switch back (d) Switch back ampliada.....	22
Figura 14 – Variáveis switch back.....	23
Figura 15 – Fluxograma de variáveis	25
Figura 16 - Bancada de ensaios.....	27
Figura 17 - Posições de corte.....	28
Figura 18 - Gráficos deslocamento x tempo e velocidade x tempo	29
Figura 19 - Cordões de solda realizados.....	31
Figura 20 - Seções transversais.....	33
Figura 21 - Seções longitudinais e suas respectivas seções transversais	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio de parametrização do movimento	26
Tabela 2 - Parâmetros fixos nos ensaios de soldagem.....	27
Tabela 3 – Resultados dos ensaios de parametrização do movimento	30
Tabela 4 – Aspectos dimensionais das faces transversais	32
Tabela 5 – Variação de Penetração medida nos cortes longitudinais dos cordões de solda com a técnica switch back.....	34

SUMÁRIO

1. IDENTIFICAÇÃO	6
2. INTRODUÇÃO.....	7
3. OBJETIVOS DO PROJETO	8
3.1 Objetivo Geral	8
3.2 Objetivos específicos	8
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
4.1 Soldagem a arco submerso.....	9
4.2 Técnica Switch back	13
5. MATERIAIS E MÉTODOS	23
5.1 Parametrização do movimento de Switch Back.....	23
5.2 Ensaio de soldagem	26
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
6.1 Parametrização da técnica	29
6.2 Ensaio de Soldagem.....	30
7. CONCLUSÕES.....	35
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	35
9. CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES.....	36
10. AVALIAÇÃO DO ALUNO EM RELAÇÃO AO PIBIC	36
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

1. IDENTIFICAÇÃO

Título do projeto do aluno	Prospecção de uma nova tecnologia de soldagem com foco no aumento da competitividade da construção naval brasileira.
Natureza do Projeto	Iniciação científica.
Grupo de pesquisa associado	LTS - Grupo de Pesquisa em Tecnologia da Soldagem.
Nome do Coordenador do Projeto (Orientador)	Tiago Vieira da Cunha.
Nome do aluno	Guilherme Zortéa.
Área do projeto	Engenharia Naval.
Instituição de execução do projeto	Universidade Federal de Santa Catarina.

2. INTRODUÇÃO

A soldagem a arco submerso (SAW) surgiu para atender às exigências da indústria naval, oferecendo altas taxas de deposição e produtividade. Amplamente empregado na indústria e em construções pesadas, este processo demanda uma estrutura robusta e utiliza fluxo para proteger o cordão de solda, o que pode limitar sua mobilidade em certas aplicações. Desde seu desenvolvimento, o processo SAW vem sendo aprimorado, em geral, concentrando-se na obtenção de altas taxas de fusão e na produção de cordões de solda com qualidade. Variáveis como corrente de soldagem, tensão do arco, velocidade de alimentação do arame e comprimento livre do eletrodo (stickout) são otimizadas para alcançar esses objetivos. Além disso, incorpora-se diferentes variáveis ao se aplicar novas estratégias como o pré-aquecimento por indução eletromagnética na peça de trabalho ou do arame após o bico de contato, visando reduzir a corrente e/ou aumentar a velocidade de soldagem. Devido à alta taxa de deposição e produtividade do SAW, sua aplicação em revestimentos tem sido estudada. Para essa aplicação, o uso do movimento de tecimento durante aumenta ainda mais a eficiência, mas enfrenta desafios devido necessidade de movimentação da robusta estrutura utilizada no processo SAW. Poucos estudos, principalmente conduzidos pelo Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS), desenvolveram equipamentos capazes de aplicar esse movimento oscilatório. Ainda no âmbito da constante evolução dos processos de soldagem, impulsionada pela crescente demanda por maior qualidade e pela necessidade de aplicação em novos cenários, surgiram inovadoras técnicas de soldagem. Semelhante a técnica de oscilação transversal, outra técnica baseada na variação da movimentação da tocha de soldagem é técnica Switch back. Nessa abordagem, que já é empregada em diferentes processos de soldagem, como MIG/MAG e TIG, ocorre a oscilação longitudinal do eletrodo, ou seja, a tocha de soldagem é movida para frente em um comprimento específico, também chamado de "avanço da tocha". Em seguida, a tocha é recuada por um comprimento geralmente igual à metade do avanço, conhecido como "reversão" ou "reco da tocha". Esse ciclo de avanço e reversão se repete de forma periódica durante a execução da soldagem. As velocidades de avanço e reversão podem ser iguais ou diferentes, a depender da parametrização do processo. Foi encontrado na literatura trabalhos que avaliaram a aplicação dessa técnica de oscilação longitudinal da tocha no processo de soldagem MIG/MAG em diferentes cotextos, sendo uma dessas abordagens para realizar o passe de raiz na união de chapas [Yamane, 2004, 2007, 2009, 2015; Almeida, 2019], onde se utilizou a técnica para obter um maior controle da poça de fusão, evitando assim perfurações. Outra abordagem encontrada foi a aplicação dessa técnica para aumentar a velocidade de soldagem, quando comparada a um ensaio feito com a trajetória linear convencional [Almeida, 2012, 2018; Bonacorso, 2017]. Os efeitos da oscilação longitudinal na tocha na microestrutura dos cordões também já foram testados no cotexto de processos de manufatura aditiva no processo MIG/MAG [Yehorov, 2019; Schwedersky, 2017]. Dessa forma, apesar de o MIG/MAG ser o processo mais próximo do SAW, não se encontra na literatura nenhum trabalho acerca da aplicação da técnica Switch Back no

processo SAW, sendo essa uma lacuna de conhecimento acerca da aplicabilidade e efeitos da oscilação longitudinal nesse processo.

3. OBJETIVOS DO PROJETO

3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa investigar os efeitos da aplicação da técnica Switch Back aplicada ao processo SAW quanto aos aspectos operacionais do processo e morfológicos dos cordões de solda.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar a estruturação de uma bancada para experimentos de soldagem SAW com a técnica Switch Back;
- Realizar ensaios de soldagem SAW com oscilação longitudinal da tocha (Técnica Switch Back) em diferentes aportes de energia;
- Caracterizar os cordões de solda obtidos com a técnica Switch Back quanto aos aspectos macroestruturais e presença de descontinuidades em seções transversais e longitudinais dos cordões de solda;
- Avaliar a aplicabilidade da tecnologia estudada.

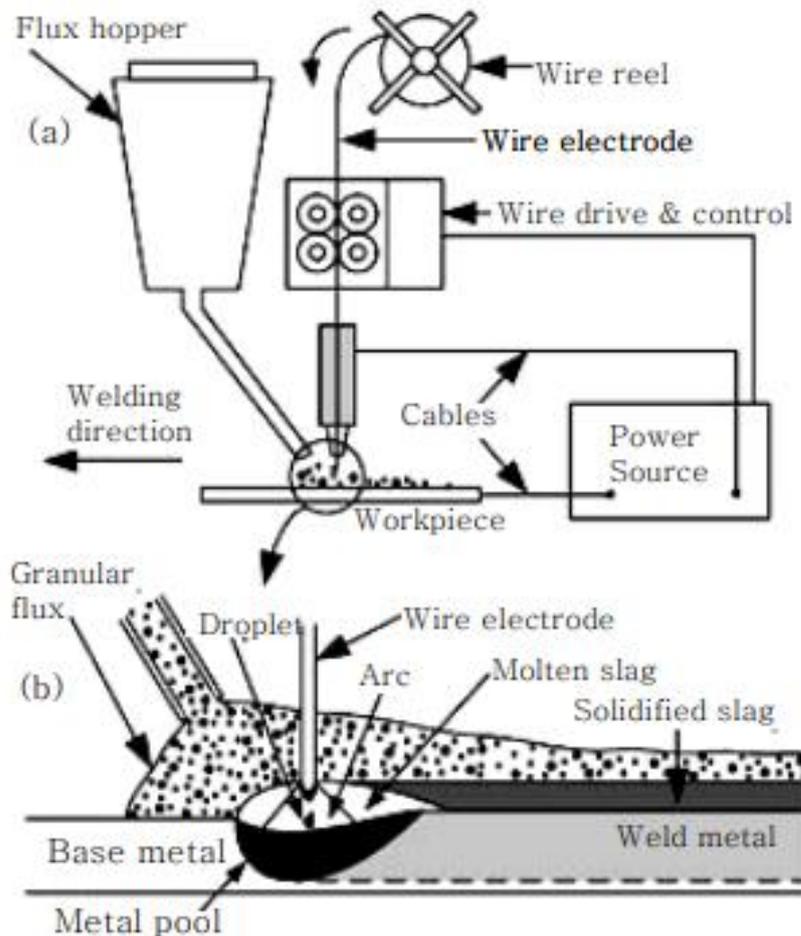
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Soldagem a arco submerso

O processo de soldagem por Arco Submerso (SAW) teve sua origem em 1935 [Houldcroft, 1990] e desde então tem sido um elemento fundamental no avanço da produtividade nos processos de soldagem, mantendo sua relevância até os dias atuais. Neste processo, o arco elétrico é estabelecido entre a peça de trabalho e um arame revestido com materiais de alta condutividade elétrica, geralmente de cobre [Machado, 1996]. Este arame é continuamente alimentado por tracionadores de arame, os quais, em certos casos, também auxiliam para desentortar o arame. Durante a execução da soldagem, o arco elétrico é completamente coberto por uma camada de fluxo granuloso. Essa camada protege o metal de contaminações atmosféricas, ao mesmo tempo que desoxida e remove impurezas do metal fundido por meio de reações químicas, além de moldar o cordão de solda, melhorar a fluidez do material de adição e adicionar elementos de liga, quando necessário para produzir soldas com melhores propriedades mecânicas, como resistência à corrosão. Uma característica distintiva do processo é que tanto o arco elétrico quanto a poça de fusão permanecem submersos pela camada de fluxo, o que resulta na ausência de faíscas ou respingos, tornando-o um processo mais seguro para o operador. A soldagem é realizada através de um módulo móvel que segue despejando fluxo concentricamente sobre o arame ao longo de seu deslocamento, permitindo que a poça fundida seja envolvida por gás proveniente do fluxo fundido. À medida que a temperatura diminui, uma camada sólida, conhecida como escória, forma-se sobre o cordão de solda, oferecendo proteção adicional. Assim, o processo de soldagem por Arco Submerso, mostrado no esquemático da Figura 1, representa uma técnica eficaz e confiável para diversas aplicações industriais, garantindo a qualidade e a integridade das soldas realizadas.

No que diz respeito aos parâmetros de soldagem definidos para o processo SAW, são eles: tensão de soldagem, velocidade de alimentação de arame, velocidade de soldagem, polaridade, combinação eletrodo-fluxo, diâmetro do arame, distância bico de contato-peça e distribuição do fluxo, que são definidos de acordo com a espessura e propriedades do metal base e tipo de solda desejado [Ramalho e Junior, 1976].

Figura 1- Esquemático do processo de soldagem a arco submerso



[KIRAN; NA, 2014]

Na execução da soldagem em uma junta, diversos parâmetros influenciam na determinação da quantidade de energia a ser aplicada, podendo alterar uma série de características, tais como a microestrutura resultante, o modo de operação, o perfil do cordão de solda, bem como a dinâmica de aquecimento e resfriamento do material. Por exemplo, o aumento da corrente de soldagem tende a elevar a profundidade de penetração, a taxa de deposição e o reforço, o que, por sua vez, viabiliza a soldagem em velocidades mais elevadas. No entanto, o incremento na velocidade de soldagem tende a reduzir características como a largura do cordão, a profundidade de penetração no metal e o reforço.

Haelsig e Mayr (2013) citam que a correlação entre os parâmetros de soldagem apresentados anteriormente deve ser feita de forma cautelosa, pois muitos estão inter-relacionados e suas combinações podem gerar efeitos de difícil análise, influenciando de diferentes formas a intensidade do arco e rendimento térmico.

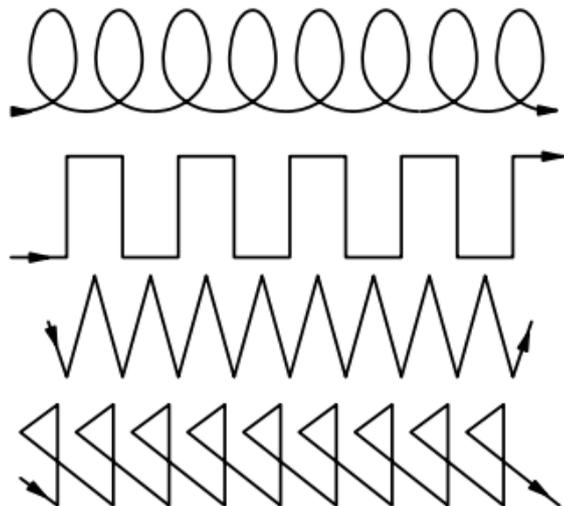
Além da qualidade do cordão de solda, a questão da produtividade, que está diretamente relacionada à taxa de deposição e à velocidade de soldagem, assume grande importância no processo, especialmente do ponto de vista econômico. Entretanto, alcançar um aumento na produtividade e na velocidade de soldagem sem comprometer os aspectos desejados no cordão de solda representa um

desafio significativo. Diante dessa realidade, têm sido desenvolvidas e aprimoradas diversas técnicas de soldagem com o intuito de enfrentar esse desafio. Entre essas técnicas, destacam-se o uso de arames múltiplos, a alteração de polaridade, a adição de arame a frio e o emprego de elevados comprimentos de stickout (distância entre o bico da tocha e a peça), dentre outras abordagens. Estas técnicas envolvem a variação dos parâmetros de soldagem e a análise dos efeitos resultantes na diluição, na geometria e nas propriedades do metal de solda e da zona afetada pelo calor.

Nesse cenário de desenvolvimento de diferentes técnicas de soldagem para atender diferentes aplicações, o tecimento (oscilação transversal da tocha) é uma técnica de soldagem utilizada, principalmente, para se depositar um cordão de solda mais largo, garantir a fusão das paredes laterais da junta, estabilizar a poça fora da posição plana e expulsar gases. Diversos padrões de tecimento são utilizados, os quais podem ser realizados dependendo do tipo de solda, da preparação da junta e da habilidade do soldador. Estudos experimentais realizados por Coraini et al (2011) demonstraram que a amplitude do tecimento deve ser relacionada com o diâmetro do arame.

O processo tecimento apresenta uma grande variedade de padrões possíveis, que devem ser selecionados de acordo com o tipo de operação e do resultado desejado. A Figura 2 mostra alguns dos padrões de tecimento mais comuns.

Figura 2 – Exemplos de padrões de tecimento

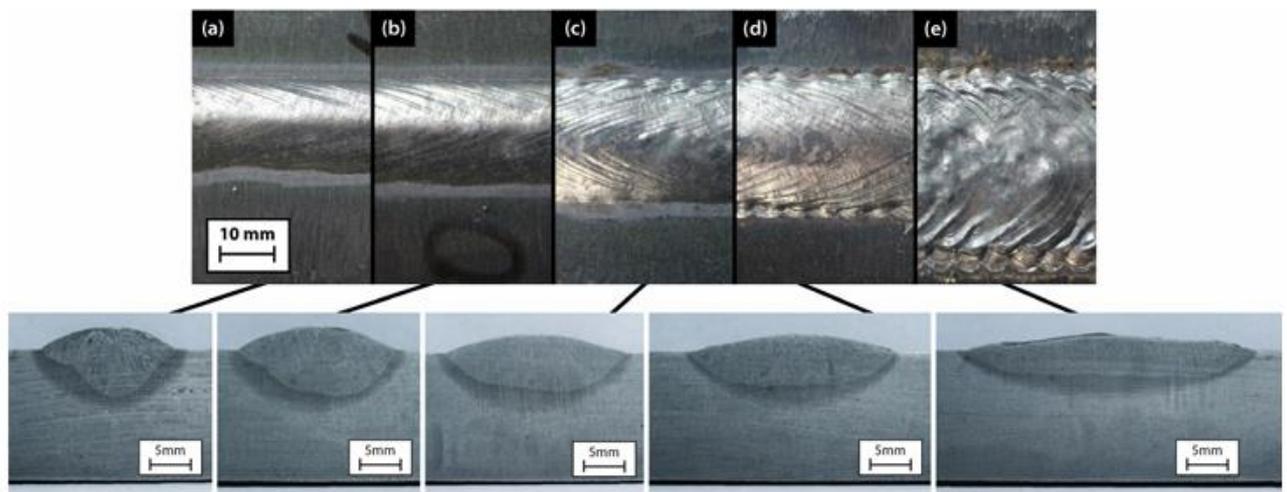


[Modenesi, 2019]

Como ressaltado por Wang et al. (2012), apesar de cada padrão de tecimento possuir suas próprias particularidades, a amplitude de tecimento, frequência e os tempos de parada central e lateral são parâmetros fundamentais que devem ser ajustados ao se adicionar esse movimento. Esses parâmetros estão intrinsecamente ligados, podendo ser estimados através de equações, que basicamente demonstram que grandes amplitudes necessitam de baixas frequências de oscilação para manter uma velocidade de soldagem apropriada e assim produzir um cordão de solda adequado.

A utilização de tecimento na soldagem a arco submerso apresenta dificuldades para a sua implementação, pois, a presença de fluxo pode acarretar problemas como incrustação de escória no cordão se não for realizada uma parametrização adequada do movimento. São muito escassos os trabalhos que tenham estudado a aplicação da técnica de tecimento na soldagem a arco submerso, sendo quase que exclusivamente realizados pelo Laboratório de Tecnologia da Soldagem (LTS). Alguns desses trabalhos, como o de Cunha e Ribeiro (2018) desenvolveram, com certas limitações, dispositivos de soldagem a arco submerso capazes de realizar a movimentação relativa entre a peça base e a tocha em duas dimensões, possibilitando a aplicação do movimento oscilatório durante a soldagem. Nesse estudo foi avaliado a aplicação do movimento oscilatório no processo SAW utilizando-se amplitudes de tecimento entre 0 e 30mm, e energias de soldagem de 15, 19 e 25 kJ/cm, obtendo-se, dentre outros, os cordões mostrados na Figura 3.

Figura 3 - Superfície e secção transversal dos cordões de solda produzidos com energia de soldagem de 25 kJ/cm e amplitude de tecimento de (a) 0 mm – Linear; (b) 10 mm; (c) 15 mm; (d) 20 mm; e (e) 30 mm.



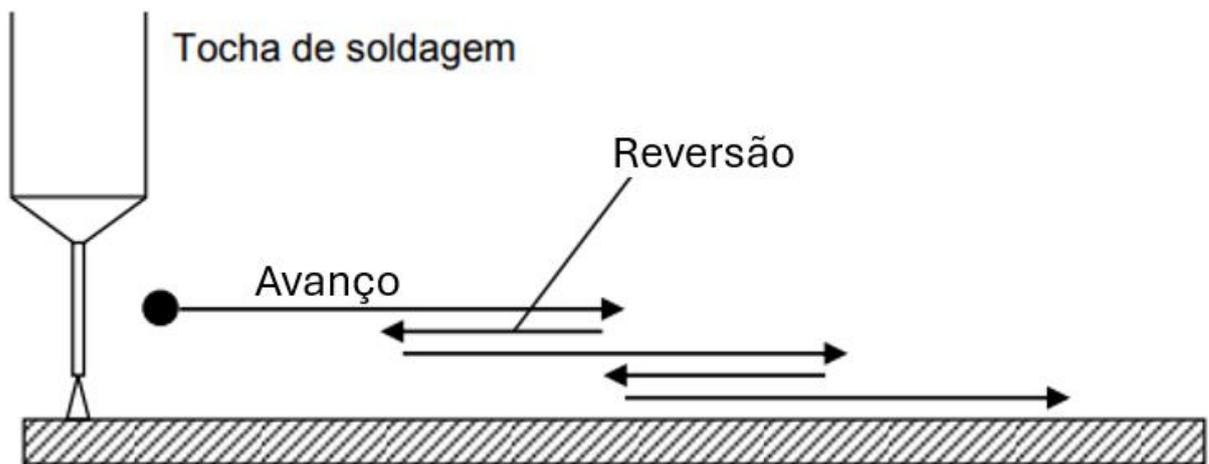
[Cunha e Ribeiro, 2018]

Durante o decorrer dos ensaios os autores notaram que a amplitude de 30 mm se manifesta de forma irregular para todos os níveis de energia de soldagem empregados, o que é evidenciado pelo excesso de mordeduras e falta de fusão. Foi suposto que esse fato se deve a uma falta de material deposição, tendo em vista que foi mantido a mesma velocidade de arame para as diferentes amplitudes de tecimento. Esse trabalho demonstrou que, nas condições utilizadas, o emprego do movimento de tecimento conduz a obtenção de cordões de solda com menores índices de penetração e reforço, maior rendimento de fusão do processo de arco submerso e estabilização da diluição para as diferentes energias de soldagem com o aumento da amplitude de tecimento, sem gerar instabilidades no processo, o que aponta a viabilidade de aplicação dessa técnica.

4.2 Técnica Switch back

No âmbito das diferentes técnicas de soldagem baseadas na movimentação da tocha está a oscilação longitudinal do eletrodo, técnica essa conhecida como switch back. Essa abordagem já foi utilizada em diferentes processos de soldagem, como MIG/MAG e TIG. Nessa abordagem, como ilustrado na Figura 4, a tocha de soldagem é movida para frente em um comprimento específico, também chamado de "avanço da tocha". Em seguida, a tocha é recuada por um comprimento geralmente igual à metade do avanço, conhecido como "reversão" ou "reco da tocha". Esse ciclo de avanço e reversão se repete de forma periódica durante o processo de soldagem. As velocidades de avanço e reversão podem ser iguais ou diferentes, a depender da parametrização do processo.

Figura 4 - Esquemático da movimentação da tocha na técnica switch back

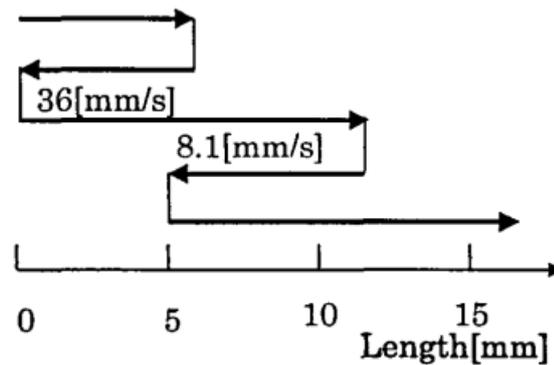


[Adaptado de ALMEIDA et al, 2018]

Apesar ter grande aplicabilidade em processos de soldagem como MIG/MAG e TIG, não foi encontrada na literatura nenhuma referência que tenha aplicado essa técnica de oscilação longitudinal no processo SAW, portanto, foi realizada a análise de trabalhos que aplicaram essa técnica no processo MIG/MAG, tendo em vista que esse é o processo mais próximo do SAW. Dentre as possíveis aplicações da técnica switch back, alguns estudos abordaram a capacidade de incremento dessa técnica no processo de união de chapas, buscando se ter um maior controle da poça de fusão no passe de raiz. Nesse contexto, Jin, B. et al. (1995) e Jin, B.; Furujo, A.; Ohshima, K. (2009) realizaram simulações numéricas para estimar o comportamento da poça de fusão na parte traseira e frontal do cordão no processo MIG/MAG pulsado com aplicação da técnica switch back, com intenção de evitar perfurações nas aplicações em passe de raiz sem a necessidade de utilizar cobre-junta. Posteriormente realizaram ensaios com os parâmetros mais adequados obtidos pelas simulações para validar seu modelo. Com o modelo já validado buscaram comparar os limites operacionais alcançados através do processo convencional e com a aplicação da técnica switch back. Quando realizada a soldagem em aço através do processo convencional

foi obtido uma largura do cordão de solda na raiz de até 3,5 mm, sem que ocorresse perfuração, enquanto com a aplicação do movimento de switch back, na configuração representada na Figura 5, foi possível se obter larguras de até 5mm.

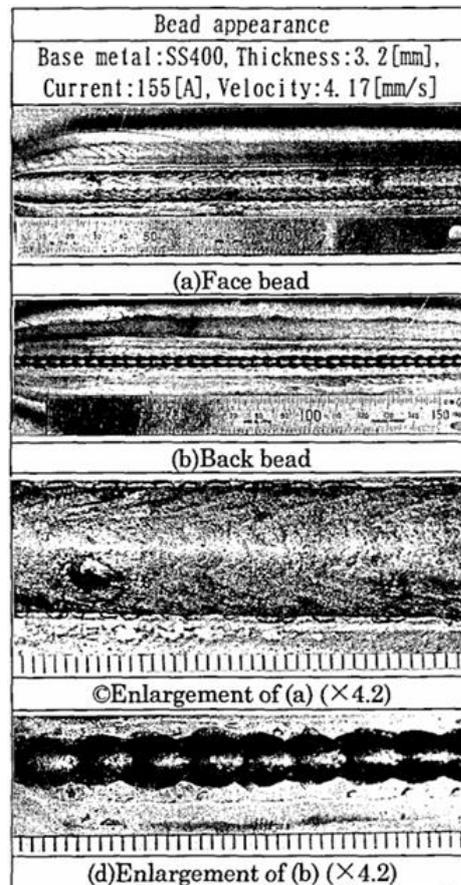
Figura 5 - Método Switch Back Utilizado



[JIN, B.; FURUJYO, A.; OHSHIMA, K., 2009]

Na aplicação com switch back foram utilizadas chapas de aço com 3,2 mm de espessura e velocidade de soldagem de 4,17mm/s, sendo que esses valores foram previamente simulados para resultar em uma corrente de 148A. Como resultado os autores obtiveram uma corrente próxima do esperado (155A) e um cordão sem perfurações, como mostrado na Figura 6.

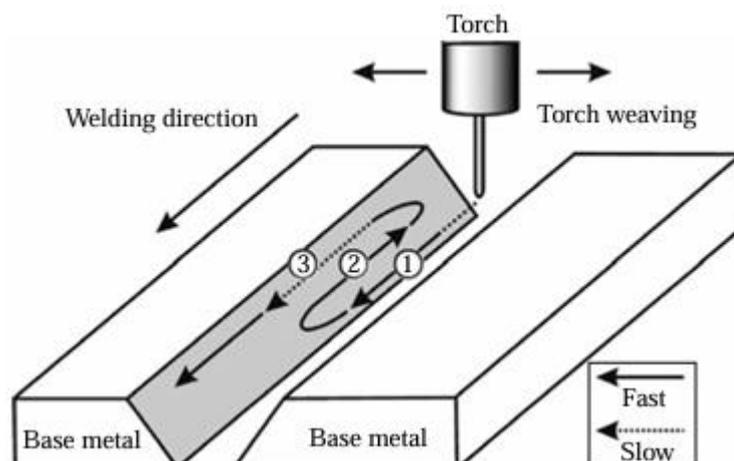
Figura 6 - Resultado experimental aplicando a técnica Switch Back



[JIN, B.; FURUJYO, A.; OHSHIMA, K., 2009]

Trabalhos como os de Yamane et al (2007, 2009, 2015) combinaram a técnica Switch-back com o tecimento transversal da tocha de soldagem, como ilustrado na Figura 7. Essa combinação de técnicas foi aplicada na soldagem MIG Pulsado de juntas de topo com chanfro em V, sem cobre-junta e com chapas de 12 mm espessura, cortada em ângulo de 45° e fresta de 2 a 4 mm.

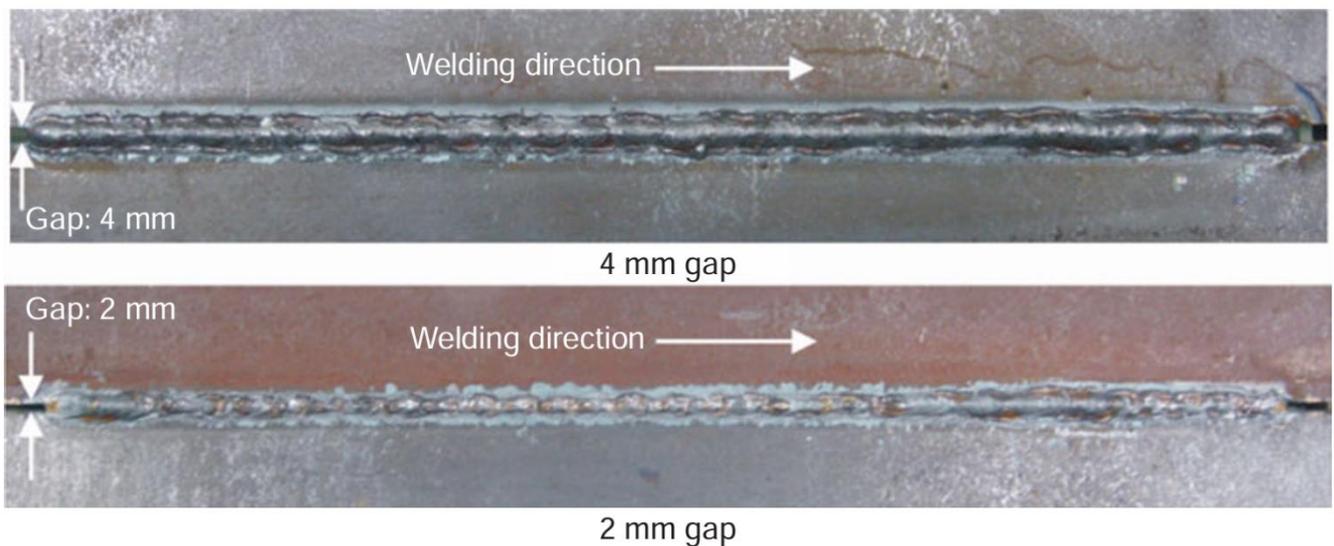
Figura 7 - Movimentação da tocha



[YAMANE et al., 2009]

Como parametrização do movimento de switch back foi realizado o passe de avanço sobre a parede da junta e o retrocesso sobre o centro. Esse movimento foi realizado de modo que quando a tocha se aproxima das bordas da raiz da junta a corrente pulsada atinge o seu valor de pico transferindo a gota metálica, e, quando se aproxima do centro da junta, a corrente atinge o seu valor de base, não ocorrendo transferência de metal, controlando assim a raiz da solda. Com essa configuração e variando os parâmetros de velocidade de avanço e reversão do movimento de switch back, os autores realizaram passes de raiz de 2 a 4 mm sem perfurar a chapa, como observado nos cordões da Figura 8.

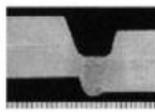
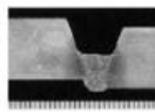
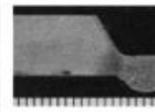
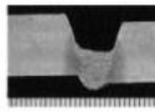
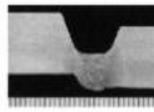
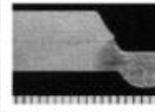
Figura 8 - Aparência da face traseira dos cordões com fresta de 2 e 4 mm.



[YAMANE et al., 2015]

Ainda nesse contexto, Yamane et al (2004) descreveram um método no processo MIG/MAG Pulsado para soldagem de multicamadas para produzir cordões traseiros com qualidade em chanfros V em chapas desalinhadas e sem utilizar cobre-junta. Dessa forma, foram realizados ensaios em chanfros com frestas de 2 a 5 mm e desalinhamento de 1 a 3 mm, onde se obteve cordões sem defeitos com as combinações mostradas na Figura 9.

Figura 9 – Cordões com frestas e desalinhamento

Gap [mm]	2	3	3	4
Misalignment [mm]	3	2	3	2
(a)				
(b)				

[Adaptado de YAMANE et al., 2004]

Para realizar esse tipo de soldagem foi utilizado um sistema integrado capaz de combinar um controle preciso da tocha de soldagem, corrente de soldagem, avanço do arame, velocidade de soldagem e movimentos de tecimento e switch back simultaneamente.

A aplicação da técnica switch back também vem sendo estudada para realizar a união de chapas em chanfros com fresta variáveis ao longo comprimento. Tal cenário foi estudado por Almeida et al. (2019), onde o autor aplicou a técnica switch back no processo MIGMAG pulsado para realizar o passe de raiz em juntas com gaps variáveis ao longo de uma mesma junta. Para isso chapas com 3,3 mm de espessura foram dispostas de modo a formar um gap progressivo ao longo comprimento. Como parâmetros fixos foram utilizados um valor médio de corrente pulsada de 145 A, distância bico de contato peça (DBCP) de 18 mm, velocidade de alimentação de arame de 4 m/min, velocidades de soldagem, linear e equivalente, iguais a 4,2 mm/s e ângulo de inclinação da tocha de 15° (empurrando no avanço e puxando na reversão). A partir disso, Almeida et al realizou ensaios lineares e com diferentes configurações de switch back a fim de comparar a faixa do tamanho de fresta que cada técnica poderia realizar sem perder qualidade no passe de raiz. Os resultados desse estudo indicaram que a técnica de switch back pode ser usada com sucesso para sustentar a poça de fusão na raiz da junta com frestas maiores. Quando aplicada essa técnica há uma forte influência e interação dos valores dos parâmetros de switch back, como comprimentos e velocidades de avanço e reversão, sobre o desempenho do processo. De modo geral de acordo com o autor, os resultados mostraram que, para frestas mais estreitas (0 a 1,0 mm), o uso de switch back não parece ser a melhor opção (movimento linear leva a uma poça de fusão maior para garantir a penetração total). Para frestas intermediárias (1,0 a 2,5 mm), as melhores condições de switch back parecem ser com comprimentos de curso mais curtos e velocidades de curso mais lentas (tamanho intermediário da poça), enquanto para frestas maiores (2,5 a 3,0 mm), as melhores condições de switch back parecem ser com comprimentos de curso mais longos e velocidades de curso mais rápidas (tamanho

menor da poça, mais facilmente sustentável).

Diante das diferentes aplicações da técnica switch back, estudos como o de Bonacorso et al. (2017) tem analisado a possibilidade de aumentar a produtividade ao utilizar essa técnica. Nesse sentido, Bonacorso et al. (2017) compararam a técnica switch back com a linear convencional para determinar o percentual do aumento de produção com qualidade na soldagem MIGMAG Pulsado, com aplicação em ângulo entre chapas de espessuras dissimilares. Nos testes realizados com a técnica linear convencional foi aplicado um valor inicial de velocidade de soldagem média (V_{sm}) de 50 cm/min e foram realizados testes aumentando a velocidade de soldagem em 10 cm/min até se chegar em 100 cm/min, utilizando-se as respectivas velocidades de alimentação de arame para se manter constante a quantidade de material depositada por unidade de comprimento de cordão de solda. Nesses ensaios foram obtidos cordões aprovados de acordo com os critérios da norma ISO, sendo estes os cordões feitos com velocidade de soldagem de 50 cm/min até 90 cm/min, sendo o cordão com 10 cm/min reprovado. Após isso foram realizados ensaios com aplicação da técnica switch back (com cursos de avanço e retorno iguais a 10 e 5 mm, respectivamente) em duas condições, sendo estas de Velocidade de avanço (v_a) = Velocidade de retorno (v_r) = $3V_{sm}$ e $v_a = 4 v_r = 6V_{sm}$. Para ambas foi aplicado velocidades de soldagem de 90, 95 e 100 cm/min, sendo que para a segunda condição foi aprovado apenas o cordão com velocidade de soldagem de 90 cm/min, enquanto na primeira foram aprovados os cordões com velocidades de 90 e 95 cm/min. Os autores concluem que a técnica de switch back, nas condições avaliadas, foi capaz de promover um aumento na produtividade (velocidade de soldagem) de apenas 5% em relação a condição linear convencional. No entanto, não foi aplicado nesse trabalho velocidade de soldagem de 0,95 m/min na condição linear para se comparar com os resultados obtidos com a técnica switch back. Logo, não é possível afirmar que houve, de fato, um aumento de 5% na velocidade de soldagem.

Ainda acerca do possível aumento de produtividade com a aplicação da técnica switch back, Almeida et al. (2018) cita o trabalho de Bruecker (2007), que comparou o processo de soldagem MIGMAG Pulsado convencional e com a aplicação do movimento de switch back. Os ensaios foram realizados em juntas sobrepostas de chapas de 3 mm de espessura. De acordo com os cordões mostrados na Figura 10, o autor declara ter alcançado uma velocidade de soldagem de 35 cm/min com o método convencional, em contrapartida a uma velocidade de 57 cm/min aplicando-se o switch back, o que representa um aumento de produção de 60%. Não se tem acesso a todos os parâmetros utilizados nos nesses ensaios, apenas aos que foram publicados por Almeida et al (2018).

Figura 10 - Máxima velocidade de soldagem na obtenção de soldas com boa aparência

Condição de Soldagem	Max. Veloc. Soldagem [cm/min]	Corrente [A]	Tensão [V]	Aparência do cordão
MIG/MAG Pulsado	35	150.5	21.4	
MIG/MAG Pulsado Switchback	57	150.9	22.0	

[ALMEIDA, 2018]

No intuito de analisar os aspectos metalúrgicos do metal de solda depositado por essa técnica, Almeida et al. (2011) aplicaram a técnica switch back no processo MIGMAG e realizaram uma análise qualitativa do efeito do ângulo de ataque da tocha e dos comprimentos de avanço e reversão sobre a estrutura de solidificação do cordão. Todos os cordões tinham 140mm de comprimento e foram realizados com ângulo de ataque de $\pm 15^\circ$. O ângulo de ataque da tocha foi avaliado em duas diferentes situações, como denominado pelo autor, empurrando-puxando (empurrando no movimento de avanço e puxando no de reversão) e puxando-empurrando (puxando no movimento de avanço e empurrando no de reversão). Quanto aos comprimentos, foram avaliados a combinação de avanço-reversão de 10-5mm, 30-15mm, 30-20mm e 60-50mm, como mostrado na Figura 11. Além desses foi feito um ensaio com uma única reversão.

Figura 11 - Condições operacionais da técnica Switch-back

Comprimento		Velocidade da tocha	
Avanço [mm]	Reversão [mm]	Avanço [cm/min]	Reversão [cm/min]
10	5	74	74
30	15	46	46
30	20	111	111
60	50	200	200

[ALMEIDA et al., 2011]

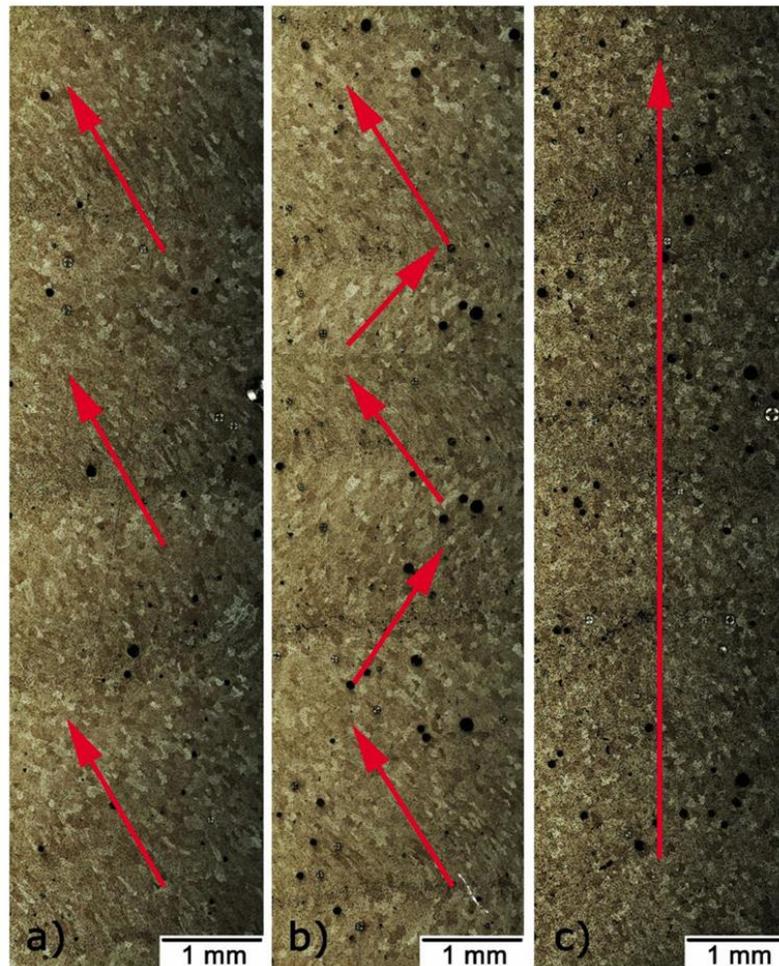
Todos os ensaios foram realizados com uma velocidade equivalente de 25 cm/min. A velocidade equivalente é definida como aquela com a qual pode ser produzido um determinado comprimento de solda pela técnica switch-back em um mesmo tempo em que se gasta para fazer um outro cordão, com o mesmo comprimento, sem o emprego da técnica. Os autores concluíram que, para uma única reversão da tocha, a inclinação mais adequada seria a puxando-empurrando, para proporcionar uma estrutura de solidificação com grãos recristalizados do metal de solda. Já no caso das soldagens com múltiplas

reversões, a inclinação mais adequada seria a empurrando-puxando, pois nesta condição é possível obter maior refino destes grãos.

As características físicas e mecânicas dos metais estão intrinsecamente ligadas à sua microestrutura. Tanto a morfologia quanto o tamanho dos grãos exercem influência significativa sobre a anisotropia, resistência e ductilidade presentes em ligas de alumínio. Em aplicações de engenharia, uma estrutura de grãos equiaxiais finos é preferível, pois resulta em melhorias nas propriedades mencionadas. No entanto, é difícil manter um controle preciso sobre a evolução da microestrutura em processos de fusão, como fundição e soldagem. No contexto da manufatura aditiva, que envolve múltiplos ciclos de fusão-solidificação e grandes gradientes térmicos, a complexidade se amplia ainda mais. No entanto, essa abordagem pode oferecer variações espaciais personalizadas na microestrutura, desde que o comportamento da solidificação seja adequadamente controlado.

É comum no processo WAAM (wire arc additive manufacturing) a formação de grandes grãos colunares. Yurii Yehorov et al. (2019) propuseram a aplicação da técnica de switch back na tocha CMT (cold metal transfer) (durante o movimento para trás, a tocha percorre uma menor distância que o curso para frente) e analisou seus efeitos na microestrutura da liga de alumínio ER5356, comparando com os resultados obtidos por soldagem unidirecional e bidirecional. Os resultados mostraram que o uso da técnica em switch_back leva à prevenção do crescimento de grãos homoepitaxiais ao quebrar o padrão de solidificação, como mostrado na Figura 12, que compara os padrões colunares e tamanhos de grão na macroestrutura longitudinal obtidos nas diferentes técnicas. Outros benefícios alcançados através do uso da técnica acima incluem o refinamento do grão, a diminuição da porosidade e a melhoria na qualidade da superfície.

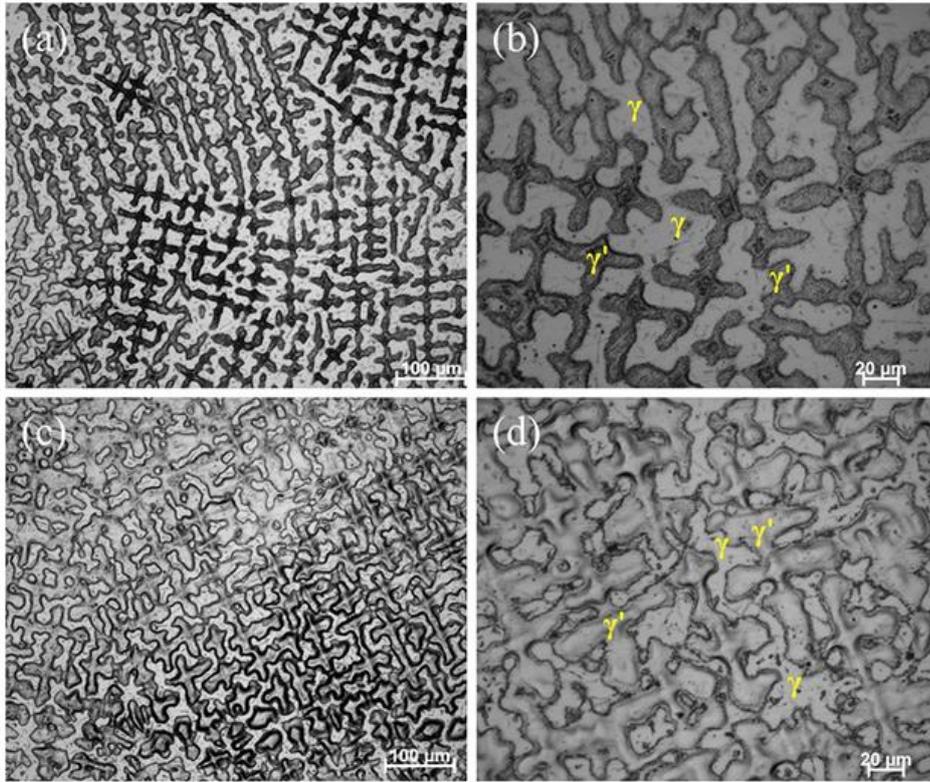
Figura 12 – Comparação da macroestrutura longitudinal com ênfase nos padrões colunares dos grãos. a) Unidirecional. b) Bidirecional. c) Switchback.



[YURII YEHOOROV et al., 2019]

A aplicação da técnica switch back na WAAM também foi estudada por Raja et al. (2017), onde utilizaram Inconel 625 e compararam as paredes depositadas aplicando-se o movimento bidirecional e com a técnica de switch back. Foram mantidos constantes a velocidade de deslocamento, taxa de fluxo de gás inerte e número de camadas depositadas para ambas as condições. Foi feita a análise das propriedades mecânicas e microestruturais dos corpos de prova. A aplicação da técnica de switch back resultou em um maior refinamento dos grãos (apresentado na Figura 13), diminuindo em cerca de 23% o afastamento dendrítico em comparação com a deposição bidirecional. Em concordância com os resultados de refinamento dos grãos, os autores observaram mudanças nas propriedades mecânicas do material, sendo que as paredes realizadas com a técnica switch back apresentaram maior dureza (índice de alongamento (ϵ) de 40%, enquanto com a deposição bidirecional esse índice é 49%), maior limite de escoamento (σ_y) (440 MPa enquanto com a deposição bidirecional se obteve 390 MPa) e aproximadamente a mesma resistência a tração de ruptura (σ_u) (com uma variação de 20 MPa) quando comparado a aplicação com movimento bidirecional.

Figura 13 - Imagem de microscopia óptica de (a) Deposição bidirecional (b) Bidirecional ampliada (c) Deposição com switch back (d) Switch back ampliada



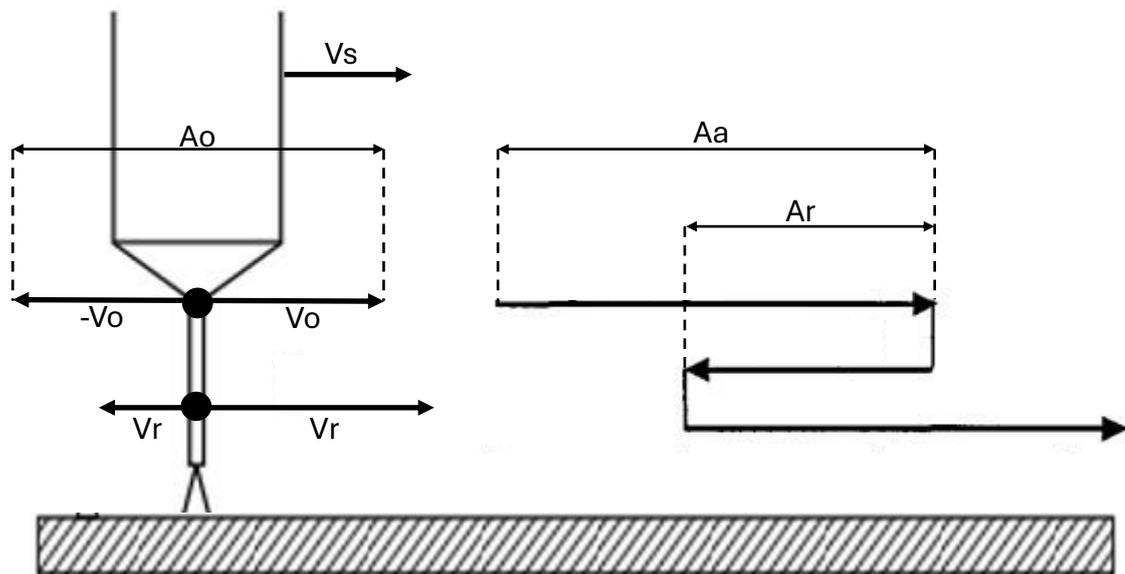
[RAJA et al., 2022]

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Parametrização do movimento de Switch Back

Para a aplicação do movimento de switch back na soldagem SAW utilizou-se o dispositivo ModulARC desenvolvido no LTS. Esse dispositivo funciona com o movimento de dois eixos independentes mostrados na Figura 14, onde todo o módulo se desloca com uma velocidade V_s (movimento de translação), enquanto o eixo fixo no módulo se desloca com uma velocidade de oscilação V_o (movimento de switch back), sendo a velocidade resultante na tocha V_r igual a soma das componentes V_s e V_o .

Figura 14 – Variáveis switch back



[Elaborado pelo autor]

Como parametrização do movimento de switch back foi feito um modelamento matemático para definir a relação entre as variáveis a partir da análise dinâmica do processo. Primeiramente foram definidas as amplitudes de avanço (A_a) e retrocesso (A_r), as quais são resultado do tempo e velocidade resultante em que a tocha estará avançando ou retrocedendo. Dessa forma, partiu-se da definição básica de deslocamento (D) apresentada na equação (1)

$$D [m] = V [m/s] * t [s] \quad (1)$$

Para se encontrar o deslocamento referente a A_a e A_r deve-se aplicar as respectivas velocidades e tempos de empregadas em cada situação. Para a velocidade foi utilizado o valor resultante das componentes de velocidade V_s e V_o . Para a variável do tempo, foi utilizado um valor referente a metade do período de oscilação (T_o), tendo em vista que em um T_o a tocha realiza um movimento de avanço e

um de retrocesso. Aplicando-se as variáveis de interesse em (1) são obtidas as seguintes equações:

$$Aa = (Vs + Vo) * \frac{To}{2} \quad (2)$$

$$Ar = (Vs - Vo) * \frac{To}{2} \quad (3)$$

Ao analisar apenas o movimento oscilatório da tocha de soldagem, nota-se que em um intervalo de tempo To a tocha realiza um deslocamento igual a 2 vezes amplitude de oscilação (Ao) (vai e volta) a uma velocidade igual a Vo . Dessa forma, ao aplicar as variáveis referentes apenas ao movimento de oscilação em (1), é obtida a seguinte equação:

$$2 Ao = Vo * To \quad (4)$$

Isolando Vo em (4) e substituindo nas equações (2) e (3) é obtido, respectivamente:

$$Aa = \frac{Vo * To}{2} + Ao \quad (5)$$

$$Ar = Ao - \frac{Vo * To}{2} \quad (6)$$

Para poder relacionar a as amplitudes de avanço e retrocesso foi criada a variável “R”, expressa pela fórmula:

$$R = \frac{Aa}{Ar} \quad (7)$$

No intuito de se obter uma expressão para a Ao , foi isolado o valor de Aa em (7) e substituído em (5) chega-se a seguinte expressão:

$$Ao = \frac{Ar (R+1)}{2} \quad (8)$$

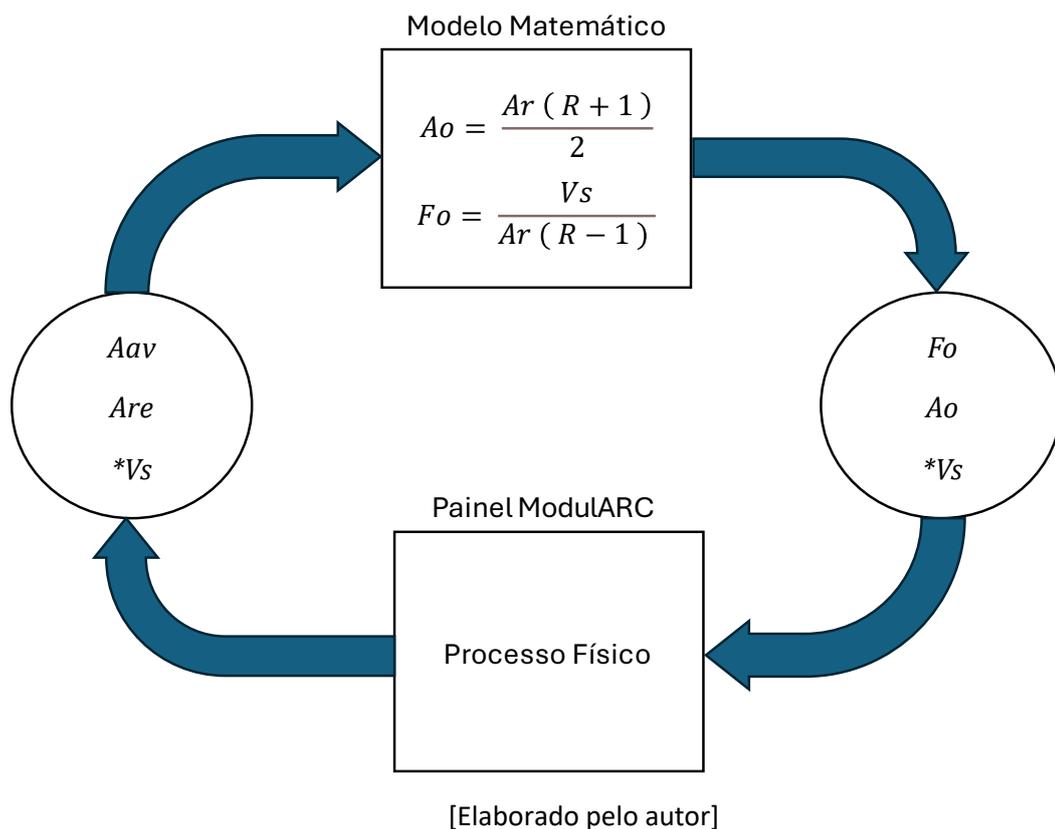
Tendo em vista que frequência é equivalente ao inverso do período, foi substituído (8) em (6)

para se obter uma equação para o To e, conseqüentemente, para a Fo , resultando na seguinte equação:

$$Fo = \frac{Vs}{Ar(R-1)} \quad (9)$$

Com as relações entre variáveis do movimento devidamente desenvolvidas, foi elaborado o fluxograma apresentado na Figura 15, o qual exemplifica a sequência de aplicação das variáveis envolvidas no sistema. No processo em questão, é necessário se definir uma velocidade de soldagem (Vs) e informar as amplitudes de avanço (Aa) e retrocesso (Ar) desejadas, dados esses que vão atuar como entrada do modelo matemático, o qual vai retornar os valores da Fo e Ao que devem ser ajustadas no painel do ModulARC para se obter o movimento com as amplitudes (Aa e Ar) desejadas.

Figura 15 – Fluxograma de variáveis



Partindo desse modelo, foram realizados ensaios sem arco para diferentes configurações do movimento de switch back, variando os parâmetros do sistema a fim de se validar o método. As combinações de variáveis setadas no ModulARC testadas estão presentes na Tabela 1. Para analisar esse movimento foi utilizado um software Tracker para rastrear o deslocamento, velocidade e aceleração da tocha da tocha e assim conferir se as parametrizações calculadas analiticamente estão corretas e são condizentes com o que ocorre na prática.

Tabela 1 - Ensaios de parametrização do movimento

Ensaio	Variáveis de entrada			Variáveis de saída	
	Vs [mm/min]	Aa [mm]	Ar [mm]	Fo [Hz]	Ao [mm]
1	300	20	10	0,5	15
2	300	30	15	0,3	23
3	300	33	16,5	0,3	25
*4	300	40	20	0,2	30
*5	300	40	20	0,3	30
6	300	50	25	0,2	38

[Elaborado pelo autor]

Tendo em vista que o ModulARC possui uma resolução de 1 mm para valores de amplitude e 0,1 Hz para frequência, as variáveis de saída já são valores arredondados dos obtidos analiticamente, sendo que os ensaios 4 e 5 possuem uma mesma combinação de variáveis de entrada, as quais resultam em uma Fo de 0,25 Hz, portanto optou-se por realizar dois ensaios diferentes, arredondando o valor de Fo para baixo e para cima, respectivamente.

5.2 Ensaios de soldagem

Para a realização dos ensaios de soldagem foi organizada uma bancada de ensaios de arco submerso, indicada na figura 16. Para isso foram utilizadas duas fontes de soldagem, sendo a (1) operando a corrente constante e a (2) operando com tensão constante, possibilitando assim gerar elevados níveis de corrente. Foi utilizado um sistema de deslocamento ModulARC (3), operando na configuração onde o eixo de oscilação se move longitudinalmente ao longo do cordão de solda (switch back). Além disso, estão presentes os demais aparatos, como, carretel de arame (4), reservatório de fluxo de soldagem (5), tracionador de arame (6), corpo de prova (7), tocha de soldagem (8), sistema de aquisição de dados de soldagem (SAP) (9).

Figura 16 - Bancada de ensaios



[Elaborado pelo autor]

Estando devidamente montada a bancada, foram determinados parâmetros fixos e materiais a serem utilizados, ilustrados na Tabela 2. A partir desses parâmetros devidamente fixados, realizou-se ensaios preliminares variando apenas as velocidades de alimentação de arame, onde foram estabelecidos três aportes de energia soldagem, mostrados na Tabela 3.

Tabela 2 - Parâmetros fixos nos ensaios de soldagem

Parâmetro	Valor
Arame	AWS EM12K
Corpo de prova	Chapa de aço carbono ASTM A36 250 x 76 x 15,8 mm
Diâmetro do arame	2,4 mm
Par arame-fluxo de solda	AWS F48A2-EM12K
Tensão de soldagem ajustada	30 V
Velocidade de soldagem	30 cm/min
Distância Bico de contato-peça	25 mm
Indutância da fonte de soldagem (ks / kd)	50 / 50

[Elaborado pelo autor]

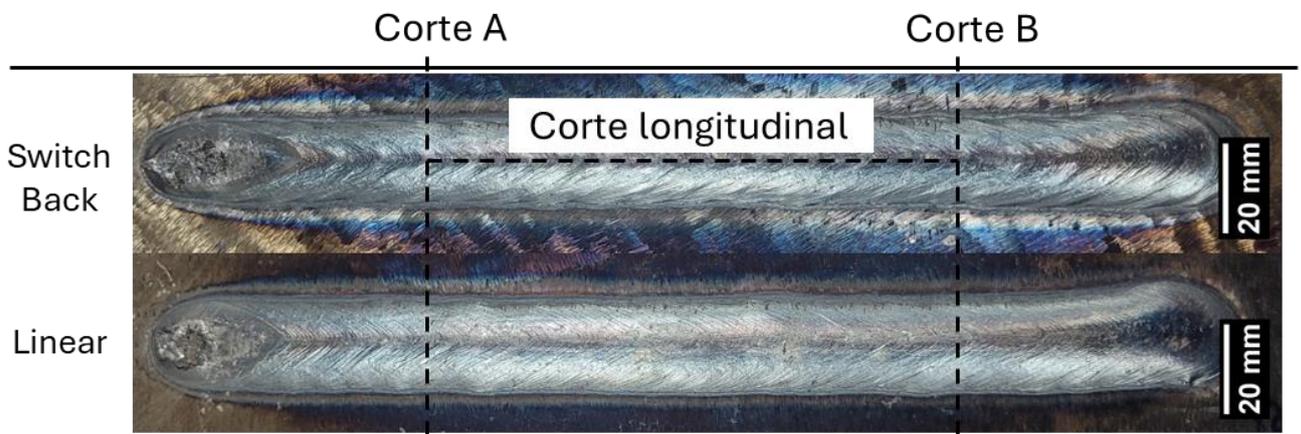
Tabela 3 - Aportes de energia utilizados

Velocidade de arame [m/min]	Corrente de soldagem medida [A]	Energia de soldagem calculada [J/cm]
2,1	345	20700
2,5	419	25140
3,2	499	29940

[Elaborado pelo autor]

Após a realização dos ensaios de soldagem foi realizado a análise metalográfica dos cordões de solda nas faces de interesse, de forma que foram feitos 2 cortes em cada cordão de solda linear e 3 cortes nos cordões com switch back, nas posições indicadas na Figura 17.

Figura 17 - Posições de cortes



[Elaborado pelo autor]

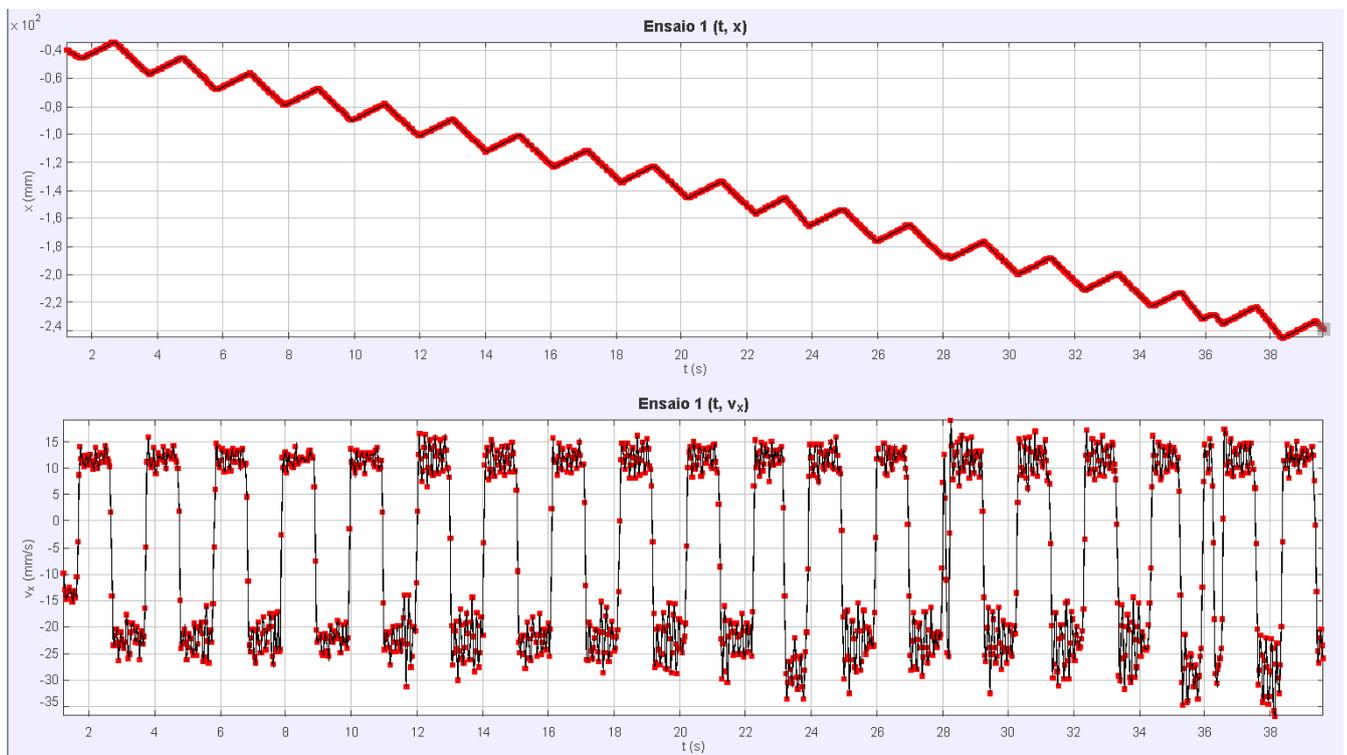
Os cortes transversais A e B foram realizados através de uma serra fita, enquanto o corte longitudinal foi feito por eletroerosão. A partir dessa separação, as faces cortadas foram devidamente lixadas até uma lixa d'água de granulometria 600 e posteriormente atacadas por imersão em uma solução de Nital 4% para revelar os cordões de solda.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Parametrização da técnica

Para verificar o verdadeiro deslocamento da tocha de soldagem foram realizados 6 ensaios sem arco, utilizando-se as combinações de F_o e A_o mostrados na Tabela 1. A partir de um ponto fixo na tocha foi rastreado o movimento da mesma nas diferentes condições. Após tratar esses dados em um software tracker foram gerados gráficos de deslocamento x tempo e velocidade x tempo, como o mostrado na Figura 18, referente ao ensaio 1.

Figura 18 - Gráficos deslocamento x tempo e velocidade x tempo



[Elaborado pelo autor]

Nos gráficos da Figura 14 é possível notar que a movimentação da tocha está bem definida e comportada durante o ensaio, com uma velocidade de avanço entre 20 e 25 mm/s e velocidade de retorno entre 10 e 15 mm/s. Os dados de posição e velocidade longitudinal obtidos no software tracker foram exportados para o Excel, onde foram medidas as amplitudes de avanço e retorno a partir da troca de sinal da velocidade. Essas amplitudes medidas estão presentes na Tabela 3, onde são comparadas com as amplitudes calculadas analiticamente a partir da V_s , F_o e A_o , definidos no ModulARC.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de parametrização do movimento

Ensaio	Parâmetros Ajustados			Amplitudes			
				Calculadas		Medidas	
	Vs [cm/min]	Ao [mm]	Fo [Hz]	Aa [mm]	Ar [mm]	Aa [mm]	Ar [mm]
1	30	15	0,5	20,0	10,0	22,2	11,4
2	30	23	0,3	31,3	14,7	35,9	17,2
3	30	25	0,3	33,3	16,7	38,2	19,4
4	30	30	0,2	42,5	17,5	48,7	20,8
5	30	30	0,3	38,3	21,7	43,8	25,4
6	30	38	0,2	50,5	25,5	58,1	30,3

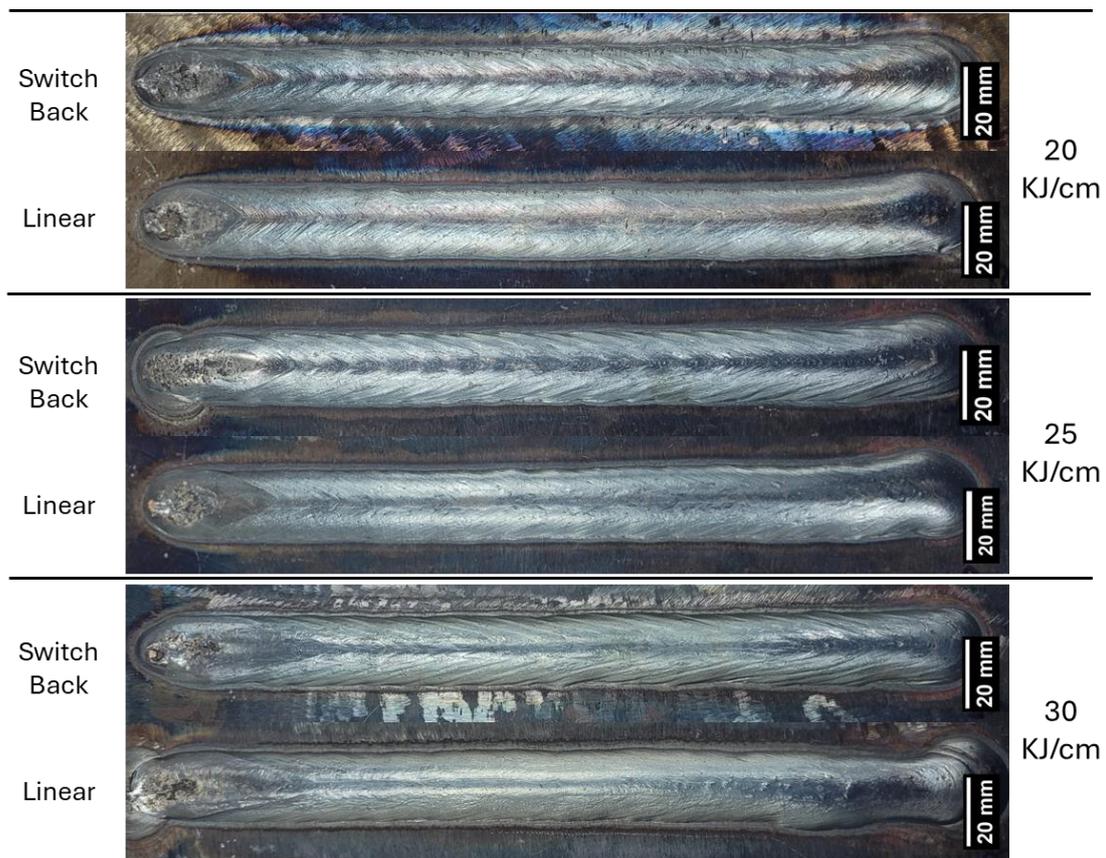
[Elaborado pelo autor]

Ao se realizar a comparação entre as amplitudes calculadas e medidas nota-se um erro de cerca 10% do valor calculado. Essa diferença deve-se principalmente aos fatores de aceleração e desaceleração do sistema, tendo em vista que para obtenção dos valores calculados considerou-se apenas velocidades constantes. Partindo desses resultados foi possível validar a movimentação com a técnica switch back e, dessa forma, realizar os ensaios de soldagem.

6.2 Ensaios de Soldagem

Após realizar a parametrização do movimento de switch back para diversas configurações, foram conduzidos ensaios de soldagem para avaliar a viabilidade e os efeitos da aplicação dessa técnica no processo SAW, utilizando diferentes aportes de energia de soldagem. Dessa forma, foram realizados cordões de solda em 3 diferentes patamares de energia de soldagem (20, 25 e 30 KJ/cm), sendo que em cada patamar de energia foram realizados um cordão de solda linear e outro com aplicação da técnica switch back, como mostrado na Figura 19. A configuração de switch back utilizada foi a referente ao ensaio 1 da Tabela 1, com a trajetória de movimento mostrado na Figura 18, onde a tocha realiza o movimento com uma $Aa = 20 \text{ mm}$ e $Ar = 10 \text{ mm}$.

Figura 19 - Cordões de solda realizados



[Elaborado pelo autor]

Na Figura 19 nota-se que tanto os cordões lineares quanto os com a técnica switch back mostraram ser regulares e com boa qualidade superficial, sem poros, trincas e principalmente sem inclusão de escória, o que se temia acontecer ao aplicar essa técnica no processo SAW. Acerca dos aspectos visuais dos cordões de solda, os cordões onde foi aplicado essa oscilação longitudinal apresentaram um aspecto escamado, que ficou mais evidente com maiores níveis de energia. Como pode ser observado na Tabela 4, não se obteve diferenças maiores que 1,2 mm (5,9%) na comparação entre as larguras dos cordões com e sem a técnica switch back, além disso, não houve um padrão nessa diferença de medidas, ou seja, não se pode afirmar que a aplicação da técnica switch back aumenta ou diminui a largura do cordão, mas sim que a mesma gera uma variação dessa dimensão ao longo do cordão de solda, como pode ser observado na Figura 19.

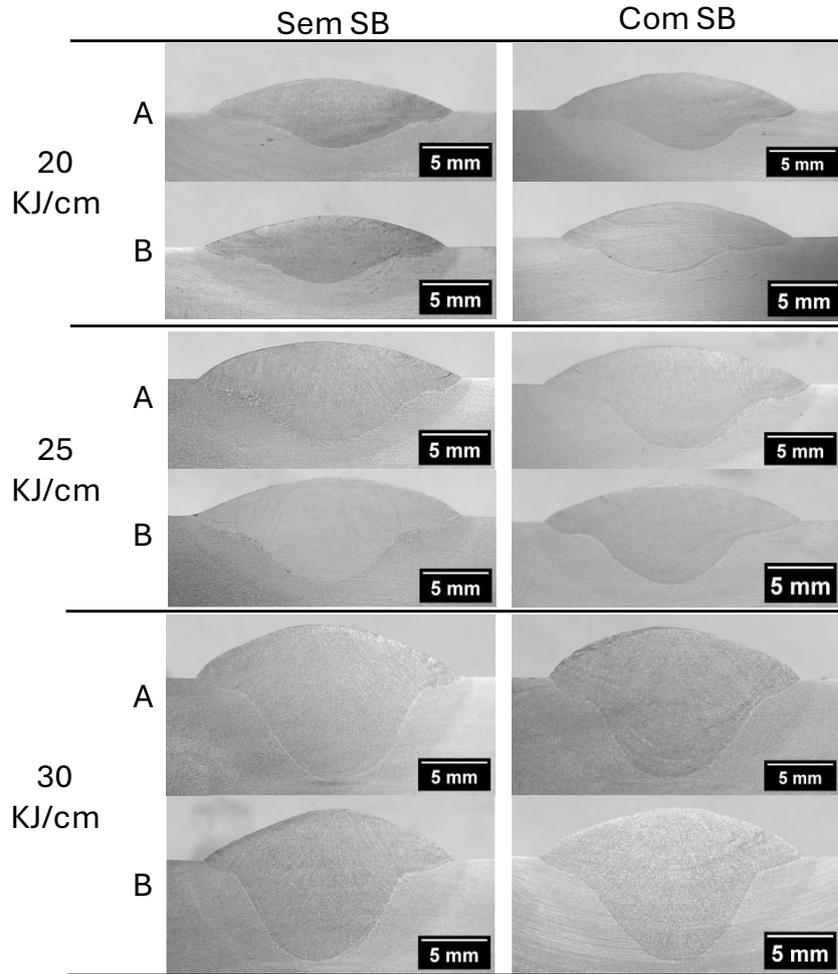
Tabela 5 – Aspectos dimensionais das faces transversais

Energia [KJ/cm]	Face	Largura [mm]		Reforço [mm]		Penetração [mm]		Área do Reforço [mm ²]		Área diluída [mm ²]		Área fundida [mm ²]	
		Linear	Switch back	Linear	Switch back	Linear	Switch back	Linear	Switch back	Linear	Switch back	Linear	Switch back
20	A	18,6	18,2	2,4	2,7	2,7	3,0	29,0	32,9	26,4	27,8	55,4	60,7
	B	18,4	17,5	2,3	2,6	2,7	2,5	27,5	29,6	25,9	24,3	53,4	53,9
25	A	20,1	20,2	2,8	2,8	4,6	4,7	38,8	38,6	47,0	49,3	85,8	87,9
	B	20,7	19,5	2,9	2,7	5,0	4,6	37,5	35,5	50,7	44,6	88,2	80,1
30	A	20,3	19,2	3,9	3,7	7,3	7,3	51,9	49,5	74,3	76,5	126,2	125,9
	B	19,8	20,4	3,7	3,6	7,3	7,5	45,5	48,7	72,2	78,4	117,7	127,2

[Elaborado pelo autor]

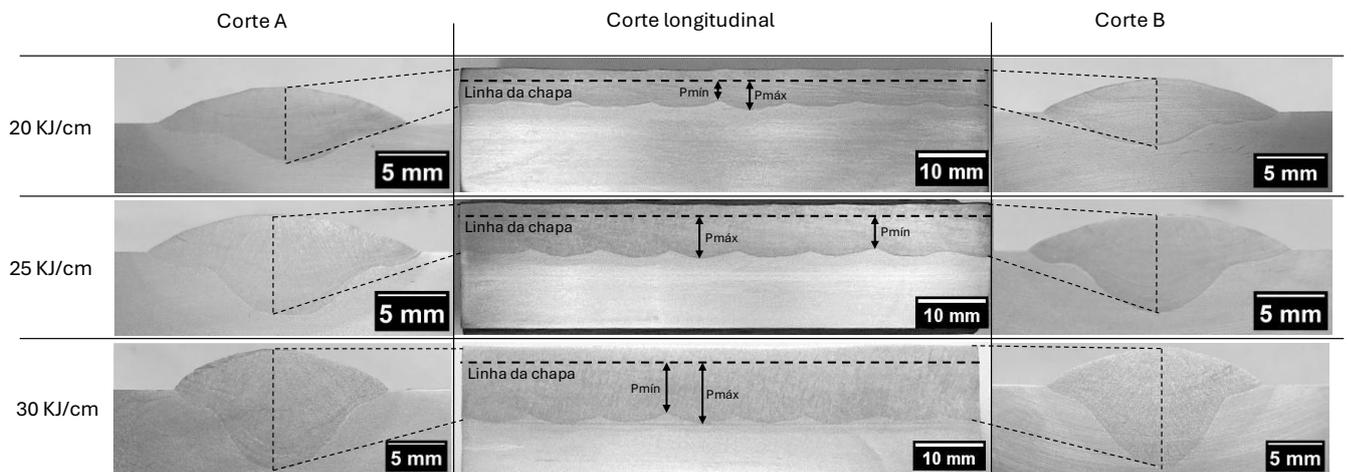
As faces dos cortes transversais A e B de cada cordão estão apresentadas na Figura 20. Ao se comparar as seções dos cordões de solda lineares e com switch back, para um mesmo patamar de energia e na mesma face, foi observado variações de até 0,3 mm (11,1%) no reforço e 0,4 mm (8%) na penetração como apresentado na Tabela 4. No entanto, da mesma forma que a largura dos cordões, não houve um padrão nessa diferença de medidas. Logo, as seções transversais não foram utilizadas como parâmetro de comparação entre cordões lineares e com switch back, tendo em vista que, como mostrado na Figura 21, a penetração varia ao longo do comprimento do cordão, o que influencia também nos demais aspectos dimensionais. Dessa forma, as seções transversais dos cordões de solda com aplicação da técnica switch back são utilizadas em conjunto com a seção longitudinal, pois a partir dessa união é possível revelar se o corte transversal foi feito em uma região de maior ou menor penetração.

Figura 20 - Seções transversais



[Elaborado pelo autor]

Figura 21 - Seções longitudinais e suas respectivas seções transversais



[Elaborado pelo autor]

Tendo em vista que no corte longitudinal não é possível distinguir o reforço da penetração, foi traçada nessa vista uma linha referente a superfície da chapa, definida a partir dos valores de reforço e penetração medidos nas faces A e B. Dessa forma, foi possível obter a variação de penetração ao longo do cordão de solda, como indicado na Tabela 5.

Tabela 6 – Variação de Penetração medida nos cortes longitudinais dos cordões de solda com a técnica switch back

Energia de Soldagem [KJ/cm]	Máxima Penetração [mm]	Mínima Penetração [mm]	Variação [mm]	Variação [%]
20	3,46	1,94	1,52	78,49
25	5,78	4,02	1,76	43,77
30	8,09	6,33	1,76	27,78

[Elaborado pelo autor]

A partir da análise dos cortes longitudinais dos cordões de solda, nos quais foram aplicadas a técnica switch back, os dados de variação na penetração mostrados na Tabela 5 indicam que a aplicação dessa técnica tem maior influência em patamares de energia menores, sendo que a partir de 25 KJ/cm se manteve a variação nos valores de penetração, mesmo com cordões maiores. Esses resultados vão contra as primeiras impressões geradas pelo aspecto superficial dos cordões citadas anteriormente, no entanto, se mostram coerentes quando se analisa do ponto de vista de molhabilidade dos cordões de solda, fator esse que aumenta quando em maiores patamares de energia e tende diminuir os efeitos de técnicas de movimentação como o switch back.

7. CONCLUSÕES

O presente estudo propôs o emprego de estratégias inovadoras das quais não há registros na literatura de aplicação no processo de soldagem a arco submerso (SAW), visando encontrar estratégias para otimizar a produtividade e qualidade do processo, criando possibilidades para diferentes aplicações do mesmo. Com o desenvolvimento do trabalho e a realização dos ensaios foi possível concluir que:

- A aplicação da técnica switch back no processo de soldagem a arco submerso é perfeitamente viável;
- O emprego da oscilação longitudinal da tocha resultou na obtenção de cordões de solda com um aspecto superficial escamado, que se mostrou mais evidente em maiores patamares de energia de soldagem.
- Da análise metalográfica dos cordões de solda onde foi aplicada a técnica switch back foi possível concluir que os valores dimensionais do cordão variam periodicamente ao longo do mesmo, sendo essa variação mais significativa ainda para cordões feitos com menores energias de soldagem, como com 20 KJ/cm, onde foi obtido uma variação no valor da penetração de até 78,49%.
- Nas condições estudadas, o emprego do movimento de oscilação longitudinal não acarreta instabilidades no processo, tampouco, em problemas relacionados à inclusão ou retenção de escória.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo representa uma abordagem inicial para verificar a viabilidade e o potencial de aplicação da técnica switch back no processo de soldagem a arco submerso. Portanto, há necessidade de se realizar novos estudos para avaliar outros fatores não abordados neste trabalho, como:

- O emprego de diferentes configurações da técnica switch back, variando-se as amplitudes de avanço e retrocesso, bem como a velocidade de soldagem e frequência de oscilação da tocha;
- A aplicação dessa técnica no processo SAW para união de chapas de menor espessura e também para a realização do passe de raiz em chanfros sem cobre-junta, tendo em vista que essas são aplicações do switch back em outros processos de soldagem, por conferir um maior controle da poça de fusão.
- A combinação simultânea do switch back com outras técnicas de movimentação no processo SAW, como por exemplo o tecimento.

9. CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES

Atividades do projeto	Mês											
	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO
Acompanhamento do projeto												
Revisão/atualização bibliográfica												
Desenvolvimento da bobina de indução												
Montagem da bancada												
Planejamento dos experimentos/ensaios de soldagem												
Realização dos ensaios de soldagem visando recobrimento												
Análise dos resultados												
Confecção do relatório final de pesquisa												

10. AVALIAÇÃO DO ALUNO EM RELAÇÃO AO PIBIC

A realização deste projeto de pesquisa proporcionou-me uma visão aprofundada do mundo da soldagem, ensinando-me lições valiosas que vão além do que se aprende em sala de aula. O aprendizado prático de preparar amostras, ajustar parâmetros de soldagem e realizar ensaios me ofereceu uma compreensão clara das atividades envolvidas em um processo de pesquisa científica. Uma das maiores lições que tirei desse projeto foi a importância de uma metodologia e de um planejamento rigorosos. Além disso, aprendi a documentar minhas ações de maneira organizada e a manter um registro detalhado de cada experimento, o que se mostrou crucial para interpretar os resultados e, ao final, apresentar conclusões sólidas. Durante o projeto, tive a oportunidade de estudar literaturas científicas e técnicas relacionadas à soldagem, o que me ajudou a compreender melhor as teorias associadas aos fenômenos observados em nossos experimentos. Sou profundamente grato pela oportunidade de participar deste projeto de iniciação científica e por todos os colegas de laboratório que tiveram grande importância para a realização deste. Essa experiência ampliou minha perspectiva sobre a engenharia e abriu portas para futuros estudos e pesquisas.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Helio Antônio Lameira de et al. Avaliação de potencialidades da soldagem MIG/MAG automatizada utilizando a técnica Swichback. 2018.

ALMEIDA, Hélio Antônio Lameira de et al. The effect of switchback parameters on root pass formation of butt welds with variable gap. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 3, n. 3, p. 54, 2019.

ALMEIDA, Hélio Antônio Lameira de; MOTA, Carlos Alberto M. da; SCOTTI, Américo. Efeitos do comprimento de reversão e do ângulo de ataque sobre a estrutura de solidificação do cordão em soldagem MIG/MAG com " Switch Back". **Soldagem & Inspeção**, v. 17, p. 123-137, 2012.

BONACORSO, Nelso Gauze et al. Técnica da Oscilação Longitudinal da Tocha para o Incremento da Produção na Soldagem em Ângulo entre Chapas de Espessuras Dissimilares. **Soldagem & Inspeção**, v. 22, n. 2, p. 207-216, 2017.

BRUECKER, D., Increasing travel speed with pulsed MIG/MAG switch-back welding on lap joint. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU.n. 16, 2007.

CORAINI, R., KOBAYASHI, Y., GONÇALVES, G. M. B., Influence of the type of groove, weaving and rolling direction on the angular distortion in robotic GMAW-P aluminium welding, **Sold. Insp.**, vol. 16, n. 2, pp. 123-136, 2011.

CUNHA, T. V. da; RIBEIRO, H. O. Avaliação do Uso do Tecimento na Soldagem a Arco Submerso. **Soldagem & Inspeção**, v. 23, n. 1, p.73-82, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2301.08>

FERRARI, Daniel Cristiano et al. Processo TIG com movimentação oscilatória longitudinal da tocha para mitigação de humping. 2019.

HAELSIG, A.; MAYR, P. Energy balance study of gas-shielded arc welding processes. **Weld World**, v. 57, p. 727–734, 2013.

HOULDCROFT, Peter Thomas. **Submerged-arc welding**. Woodhead publishing, 1990.

JIN, B.; FURUJYO, A.; OHSHIMA, K. Control of back molten pool shape by using switchback method. **Welding international**, v. 14, n. 1, p. 19-25, 2000.

JIN, B. et al. Control of back weld pool shape in MIG welding by using switch back method. In: **IAS'95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting**. IEEE, 1995. p. 1835-1840

KIRAN, D. V.; NA, S.-J. Experimental studies on submerged arc welding process. **Journal of Welding and Joining**, v. 32, n. 3, p. 1–10, 2014.

MACHADO, I. G. **Soldagem & técnicas conexas: Processos**. Porto Alegre: editado pelo autor, p.477, 1996.

MODENESI, P.J.; “Técnica Operatória da Soldagem SMAW”. **InfoSolda**, 2019.

RAJA, Manivannan et al. Effect of bidirectional and switchback deposition strategies on microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured Inconel 625. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-17, 2022.

RAMALHO, J.P.; JÚNIOR, L.G., **Manual de soldagem ao arco elétrico**, SENAI – São Paulo, 1976

SCHWEDERSKY, Mateus Barancelli et al. Switch back technique enhances the productivity of the TIG welding process. **Welding in the world**, v. 61, n. 5, p. 971-977, 2017.

WANG, J.; ZHU, J.; FU, P.; SU, R.; HAN, W.; YANG, F. A swing arc system for narrow gap GMA welding. **ISIJ International**. 2012;52(1):110-114. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.52.110>.

YAMANE, S.; YAMAMOTO, H.; ISHIHARA, T.; KUBOTA, T.; EGUCHI, K.; OSHIMA, K. **Adaptive control of back bead in V groove welding without backing plate**. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 9, n. 2, p. 138-148, 2004. DOI: 10.1179/136217104225017044.

YAMANE, S.; UJI, K.; NAKAJIMA, T.; YAMAMOTO, H. **Application of switch back welding to V groove MAG welding**. *Welding International*, v. 29, n. 2, p. 103-109, 2015. DOI: 10.1080/09507116.2012.753253.

YAMANE, Satoshi et al. In process control of weld pool using weaving control in switch back

welding. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, v. 27, n. 2, p. 32s-36s, 2009.

YAMANE, Satochi et al. Torch weaving and feed-forward control of back bead in one side backing less V groove welding by using switch back welding. **IIW Doc**, v. 12, p. 1931-07, 2007.

YEHOROV, Yurii; DA SILVA, Leandro João; SCOTTI, Américo. Exploring the use of switchback for mitigating homoepitaxial unidirectional grain growth and porosity in WAAM of aluminium alloys. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, p. 1581-1592, 2019.